نشریهٔ علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
DOI: 10.22067/jacsm.2022.75343.1099
سال سی وسه، شمارهٔ دو، ۱٤۰۰(۸۳ – ۹۲)

مطالعهٔ عددی تأثیر پارامترهای ساختاری و عملکردی در احتراق غیر پیش‌آمیخته گاز طبیعی در سه لولهٔ تابشی با هندسه‌های مختلف*

مقاله پژوهشی

مهدی نیکنام عضدی(۱) محمد مقیمان (۲)

چکیده *در پژوهش حاضر به‌کمک ابزار دینامیک سیالات محاسباتی سه نوع لولهٔ تابشی مستقیم، U شکل و W شکل با هم مقایسه شده‌اند. هندسه‌ها پس از طراحی، در نرم‌افزار گمبیت شبکه‌بندی شدند. استقلال از شبکه نیز برای هندسهٔ W شکل که پیچیده‌ترین هندسه بود انجام شد. نتایج تحقیق نخست نشان داد که مقدار انتشار آلایندهٔ اکسید نیتروژن در لولهٔ تابشی U شکل در مقایسه با لوله‌های تابشی مستقیم و W شکل بیشترین مقدار و در نوع W شکل کمترین مقدار است. لولهٔ تابشی W شکل نسبت‌به دو نوع دیگر دارای راندمان بیشتری (۵۵/۳ ٪) است. هم‌چنین نسبت انتقال حرارت تابشی از سطح دیواره به کل انتقال حرارت از سطح دیواره در هر سه نوع لولهٔ تابشی بالا و بیش از ۹۰ درصد است. با فاصله گرفتن از دیوار لولهٔ تابشی در هر سه نوع لوله مقدار تابش بر واحد سطح کاهش می‌یابد. هم‌چنین بیشترین مقدار شدت تابش مربوط به لولهٔ W شکل و پس از آن U شکل و درنهایت کمترین مقدار مربوط به لولهٔ مستقیم می‌باشد.*

واژه‌های کلیدی احتراق، لولهٔ تابشی، آلاینده‌ها، دمای سطح.

مقدمه

لوله‌های تابشی یا همان گرماتاب‌های صنعتی چندین مدل و هندسه دارند. ساده‌ترین مدل و طرح لولهٔ تابشی، هندسهٔ I شکل با یک مشعل در یک سمت و خروجی گازهای احتراق در سمت دیگر می‌باشد. این نوع لولهٔ تابشی فقط در اروپا در سال‌های گذشته یافت می‌شد. دلیل استفادهٔ کم از این نوع لولهٔ تابشی عدم استفاده از پیش‌گرمایش هوای احتراق، مشکلات مربوط به آب‌بندی قسمت متحرک لولهٔ تابشی به‌خاطر تنش حرارتی، عدم توزیع یک‌نواخت ناکافی دما در سطح لولهٔ تابشی و دمای بالای گازهای دودکش در خروجی لوله است [1,2]. برای یک سطح بزرگ، لوله‌های تابشی I شکل می‌توانند با ایجاد خم‌ها و بازوهای اضافی به‌منظور ایجاد لوله‌های تابشی U شکل و W شکل گسترش یابند. با این گسترش‌ها، سطوح تابشی لوله‌ها می‌تواند بزرگ شود. برای لوله‌های تابشی I شکل، U شکل و W شکل مشعل در یک انتها و خروجی گازهای دودکش در انتهای دیگر قرار می‌گیرد. در یک لولهٔ تابشی یک‌طرفهٔ بدون برگشت مجدد، یک لولهٔ داخلی در نوع I شکل جای‌گذاری و سمت مقابل مشعل بسته می‌شود. مشعل درون لولهٔ داخلی قرار داده می‌شود و گازهای دودکش ابتدا درون لولهٔ داخلی حرکت می‌کنند و از طریق فضای حلقوی بین لولهٔ داخلی و لولهٔ تابشی برمی‌گردند. لوله‌های تابشی بدون برگشت مجدد مانند لوله‌های U شکل و W شکل بیشتر در بازار امریکا استفاده می‌شوند.

در گرماتاب‌های صنعتی توزیع دمای یک‌نواخت به‌خاطر دست‌یابی به انتقال حرارت یک‌نواخت به

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۱۱/۲٦ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۲/۱۷ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
(۲) نویسنده مسئول: استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
Email: moghiman@um.ac.ir

محصولات و یا محیط، انتقال حرارت بیشینه و عمر طولانی لوله‌های تابشی مهم می‌باشند.

پژوهش‌های متعددی در زمینهٔ شبیه‌سازی و طراحی لوله‌های تابشی صورت گرفته‌است [3-6]. اسکریبانو (Scribano) و همکاران [7] یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی یک مشعل لولهٔ تابشی خودبهبودبخش تک‌انتها با سوخت گاز طبیعی که احتراق در آن به‌صورت غیرپیش‌آمیخته بود و در صنعت فولاد برای انتقال حرارت سطحی مورد استفاده قرار می‌گرفت، انجام دادند. تحلیل آن‌ها با تمرکز روی پارامترهای تأثیرگذار اصلی شامل راندمان حرارتی و انتشار آلاینده‌ها در خروجی (اکسیدهای نیتروژن و مونواکسید کربن) برای شرایط عملکردی مختلف مشعل شامل توان حرارتی ورودی از ۱۲/۸ تا ۱۸ کیلووات و نسبت هم‌ارزی از ۰/۵ (شعلهٔ خیلی رقیق) تا ۰/۹۵ (شرایط شبه‌استوکیومتری) انجام شد.

آهنج و همکاران [8] در یک کار عددی یک گرم‌کنندهٔ تابشی را که از گاز طبیعی استفاده می‌کند به‌صورت تئوری طراحی کردند تا بتواند حرارت را از لولهٔ تابشی به‌صورت تابشی به محیط منتقل نماید. تأثیر نسبت سوخت به هوا بر روی انتقال حرارت از لوله مورد مطالعه قرار گرفت. از نتایج پیش‌بینی‌شده نسبت بهینهٔ جرمی سوخت به هوا که بالاترین شار تابشی را دارد به‌دست آمد. از نتایج دیگر این تحقیق آن بود که مقدار هوای اضافی بیش از حد نیاز می‌تواند عاملی برای کاهش دمای کل لوله باشد.

چوئنچیت (Chuenchit) و همکاران [9] اثر طول لوله را بر مشخصه‌های احتراقی یک مشعل لولهٔ تابشی که برای بازگشت مجدد انرژی از یک مبدل حرارتی متخلخل استفاده می‌کرد، بررسی کردند. سه طول مختلف (۰/۸، ۱ و ۱/۲۵ متر) برای یک لولهٔ U شکل که دارای ۱۰ سانتی‌متر قطر بود در نظر گرفته شد. نتایج آنان نشان داد که در طول ۱/۲۵ متر لولهٔ تابشی، بیشینه دمای داخل لولهٔ تابشی ۱٤۸۱ درجهٔ سانتی‌گراد و مقادیر انتشار آلاینده‌های مونواکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن به‌ترتیب کمتر از ۳۳٦ppm و ٤٥۰ppm گزارش شده‌اند.

نیدرر (Niederer) و همکاران [10] امکان بهبود کارایی یک کورهٔ پخت غیرمستقیم با لوله‌های تابشی را به‌کمک روابط ریاضی بررسی کردند. آن‌ها ابتدا اثر نسبت سوخت به هوا را بر راندمان به‌وسیلهٔ روابط خطی تحلیل کردند و سپس محدودهٔ عملکردی بهینه برای یک لولهٔ تابشی خاص و یک روش کنترلی جدید برای تامین سوخت ارائه دادند.

معادلات حاکم

معادلات حاکم به صورت زیر ارائه شده‌اند.

معادله بقای جرم یا پیوستگی را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، ρ چگالی و u_i سرعت متوسط جریان ا ست. معادله بقای اندازه حرکت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \qquad (۲)$$

که p فشار استاتیکی، μ لزجت دینامیکی و δ_{ij} دلتای کرونکر است که مقدار آن هنگامی که $i = j$ برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.

معادله انرژی نیز به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)$$

$$+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sum_k h_k\left(\rho D_k+\frac{\mu_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial Y_k}{\partial x_i}\right)+S_h$$
(۳)

در رابطه فوق، λ ضریب هدایت حرارتی، c_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، Pr_t عدد پرانتل آشفته، T دما، Y_k کسر جرمی گونه k ام، D_k ضریب نفوذ گونهٔ kام، Sc_t عدد اشمیت آشفته و h انتالپی می‌باشد.

معادلهٔ بقای جرم NO نیز به‌صورت رابطهٔ زیر قابل بیان است [11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO})+\nabla.(\rho\vec{v}Y_{NO})=\nabla.(\rho D\nabla Y_{NO})+S_{NO}$$
(٤)

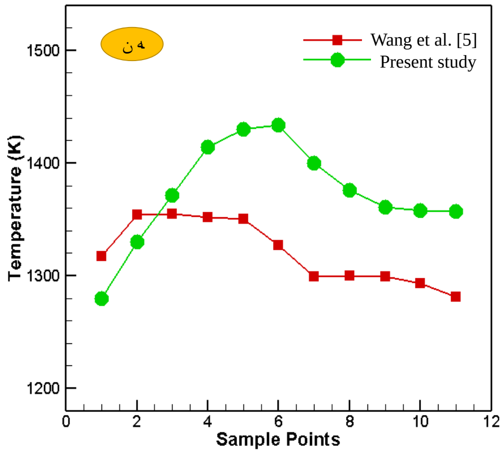
لازم به ذکر است که برای هر لولهٔ تابشی بازدهی تعریف می‌شود که عبارت است از نسبت حرارت تابش‌شده از سطح لوله به انرژی تولیدی لوله. این بازده از طریق رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

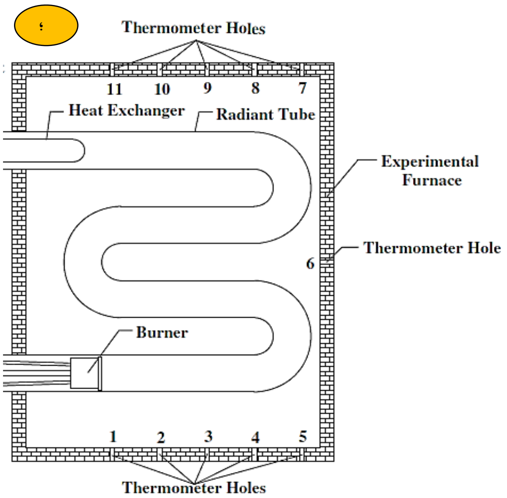
$$\eta_{radiant\ tube}=\frac{\text{نرخ کلی انتقال حرارت}}{\text{توان ورودی لوله تابشی}}*100$$
(٥)

اعتبارسنجی

در این قسمت کلیهٔ مراحل شبیه‌سازی عددی شامل اعتبارسنجی حل، مقایسهٔ نتایج حاصل از مدل‌سازی احتراق با داده‌های آزمایشگاهی، استقلال از شبکه و مقایسهٔ سه نوع اصلی لولهٔ تابشی مستقیم، U شکل و W شکل ارائه خواهد شد.

قبل از بحث بر روی نتایج، ابتدا مدل‌سازی حاضر از طریق مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی برای یک لولهٔ تابشی W شکل با داده‌های تجربی وانگ و همکاران [5] صحت‌سنجی خواهد شد. شکل (۱- الف) دماهای اندازه‌گیری‌شده و حاصل از شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. نقاط اندازه‌گیری دما در شکل (۱- ب) مشخص هستند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی با داده‌های تجربی تطابق قابل قبولی دارد و حداکثر خطا حدود ۱۰ درصد می‌باشد که برای شبیه‌سازی احتراق خطای قابل قبولی می‌باشد.





شکل ۱ (الف) مقایسه بین دماهای اندازه‌گیری شده و نتایج عددی، (ب) نقاطی که دمای آن‌ها در صحت‌سنجی اندازه‌گیری شده

اطلاعات ورودی و شرایط مرزی

برای ورودی‌های سوخت و هوا از شرط مرزی تعیین نرخ جریان جرم ورودی استفاده شده است. توان مشعل وقتی سه نوع لولهٔ تابشی مقایسه می‌شوند ۷۵ کیلووات و در طرح جدید ارائه شده برای لولهٔ تابشی W شکل به همراه لوله بازگشت ۱۵۰ کیلووات در نظر گرفته شده است، بنابراین با توجه به ارزش حرارتی پایین سوخت

متان نرخ جریان جرم ورودی سوخت از رابطه زیر به‌دست می‌آید [12].

$$Power_{RadiantTube} = \dot{m}_{ch4} LHV_{ch4} \rightarrow \dot{m}_{ch4} = \frac{150Kw}{50000\frac{Kj}{kg}} = 0.003\frac{kg}{s} \quad (٦)$$

در رابطۀ بـالا LHV_{ch4} ارزش حرارتی پـایین سوخت متان می‌با شد که مقدار آن از مرجع [12] قرار داده شده‌ا ست. نرخ جریان جرم سوخت برای مقایسهٔ سه نوع لولهٔ تابشی $0.0015\frac{kg}{s}$ می‌شود.

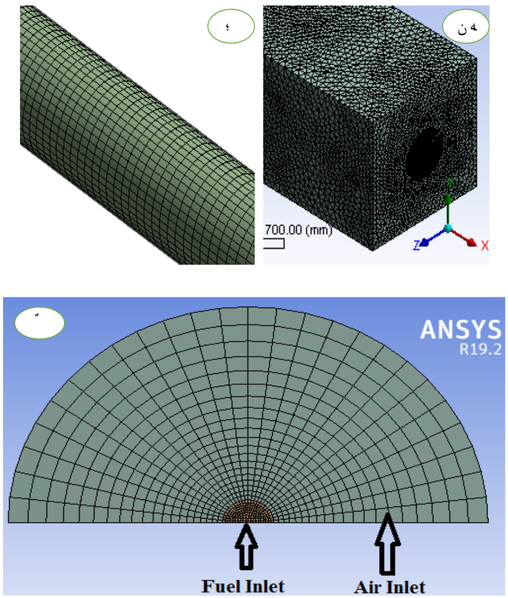
در تمام حالت‌ها احتراق با ده درصد هوای اضافی (نســبت اســتوکیومتری برابر ۰/۹۱) انجام شــده‌اســت، بنابراین نرخ جر یان جرم هوا را می‌توان از رابطهٔ زیر محاسبه کرد.

$$\dot{m}_{air} = 17.19\frac{\dot{m}_{ch4}}{\varphi} \rightarrow \dot{m}_{air} = 17.19\frac{0.003}{0.91} = 0.0567\frac{kg}{s} \quad (٧)$$

نرخ جریان جرم هوا نیز برای مقایسهٔ سه نوع لولهٔ تابشی $0.02835\frac{kg}{s}$ می شود. دمای سوخت در ورودی ۳۰۰ کلوین می‌با شد و فرض شده‌ا ست هوای احتراق ابتدا تا ۶۰۰ کلوین پیش‌گرم می‌شـــود و ســـپس برای واکنش وارد لولهٔ تابشی می‌گردد.

شبکه‌بندی حوزهٔ حل

تولید هندسهٔ لولهٔ تابشی قسمت اعتبارسنجی با نرم‌افزار گمبیت (Gambit) انجام شده‌است و شبکه‌بندی آن نیز در این نرم‌افزار انجام شده‌است. برای سایر شبیه‌سازی‌ها تولید هندسه در نرم‌افزار دیزاین مدلر (Design modeler) و شبکه‌بندی در نرم‌افزار انسیس مشینگ (Ansys meshing) انجام شده‌است. شکل (۲) شبکه‌بندی لولهٔ تابشی مستقیم را به‌همراه محیط اطراف آن و همچنین شبکه‌بندی لولهٔ تابشی را به‌تنهایی نشان می‌دهد. لولهٔ تابشی دارای شبکه‌بندی سازمان‌یافته و محیط اطراف آن دارای شبکه‌بندی غیرسازمان‌یافته می‌باشد. شبکه‌بندی لوله‌های تابشی U و W شکل نیز به همین صورت انجام شده‌است.



شکل ۲ شبکه‌بندی (الف) محیط اطراف، (ب) لولهٔ گرماتاب و (ج) سطح مقطع ورودی های هوا و سوخت

استقلال از شبکه

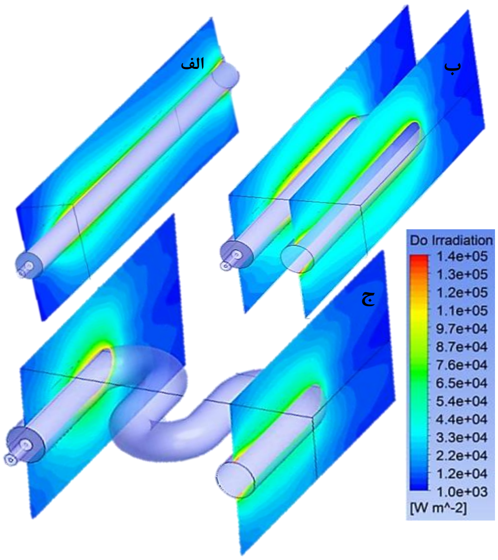
برای بررسی عدم وابستگی نتایج عددی به تعداد سلول یا حجم کنترل، تعداد شبکه‌های مختلف درنظر گرفته می‌شوند و مقادیر برخی پارامترها در این تعداد شبکه‌ها گزارش می‌شوند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اختلاف نتایج با تعداد شبکه‌بندی متوسط و ریز ناچیز می‌باشد، درحالی‌که اختلاف نتایج شبکه‌بندی درشت و متوسط قابل ملاحظه است و بنابراین تعداد سلول ۹۶۹۶۴۰ برای شبکه‌بندی کافی نیست، اما با اطمینان می‌توان تعداد سلول ۲۰۰۱۷۹۱ را برای شبکه‌بندی انتخاب کرد. تعداد سلول برای شبکه‌بندی سایر هندسه‌های متفاوت نیز تقریباً همین تعداد بوده‌است.

جدول ۱ پارامترهای عملکردی مهم لولهٔ تابشی مستقیم با محیط اطراف برحسب تعداد سلول

تعداد سلول	دمای بیشینه (K)	دمای خروجی (K)	دمای بیشینهٔ دیوار (K)	راندمان لولهٔ تابشی (%)	NO در خروجی (ppm)
۹٦۹٦٤۰	۲۳۳۷	۱٥٤۱	۱۱۰۸	٥۲/۸	۲۹۱
۲۰۰۱۷۹۱	۲۳٥۱	۱٥٤٥	۱۰۷٦	٥۲/٦	۳۱۲
۳۹۳۲۳۱۰	۲۳٥۲	۱٥٤٦	۱۰٦۲	٥۲/٥	۳۱٤

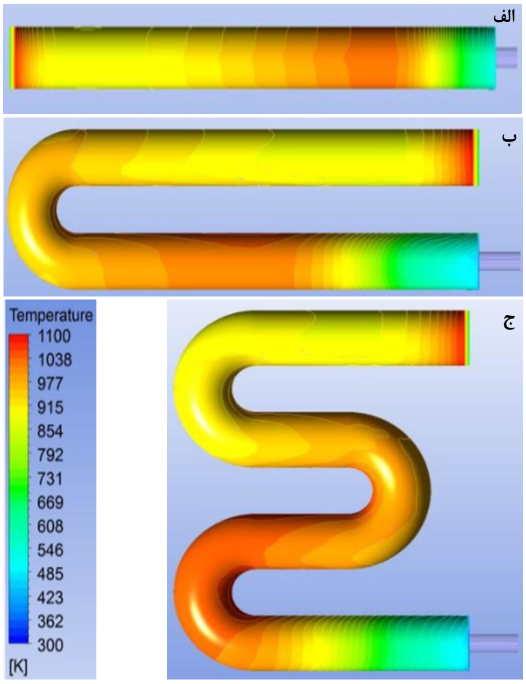
نتایج و بحث

شکل (۳) شدت تابش بر واحد سطح بر روی صفحه (های) عمودی در جهت جاذبه در سه نوع لولهٔ تابشی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود با فاصله گرفتن از دیوار لولهٔ تابشی در هر سه نوع لوله مقدار تابش بر واحد سطح کاهش می‌یابد. هم‌چنین بیشترین مقدار شدت تابش مربوط به لولهٔ W شکل و پس از آن U شکل و درنهایت کمترین مقدار مربوط به لولهٔ مستقیم می‌باشد.



شکل ۳ شدت تابش بر واحد سطح روی صفحات عمودی درجهت جاذبه در هر سه لولهٔ تابشی

دیگر بیشتر است. از عوامل مهم دیگر که می‌توان مورد بررسی قرار داد میزان یک‌نواختی دما می‌باشد، یک‌نواختی دما به این علت مهم است که سبب طول عمر بیشتر برای لوله می‌شود اما اختلاف دماهای شدید سطح لوله باعث ایجاد تنش‌های حرارتی دیوارهٔ لوله و کاهش عمر آن می‌شود. مطابق شکل (٤) لولهٔ U شکل دارای بیشترین یک‌نواختی در بین بقیهٔ لوله‌ها است.



شکل ٤ توزیع دمای سطح سهٔ گرماتاب مستقیم، U شکل و W شکل

در شکل (٤) توزیع دما روی سطح لولهٔ تابشی در هر سه نوع لولهٔ تابشی نشان داده شده‌است. دمای بیشینه روی دیوار نوع W حدود ۱۰۹۹ K است و از دو نوع

در جدول (۲) پارامترهای مهم عملکردی در سه نوع گرماتاب مورد بررسی درج شده‌است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقدار آلایندهٔ اکسید نیتروژن در

خروجی لولهٔ U شکل به‌دلیل بالا بودن بیشینه دمای گازها نسبت‌به لولهٔ تابشی مستقیم و W شکل بیشتر است. دمای خروجی گازها در لولهٔ تابشی W شکل نسبت‌به دو نوع لولهٔ تابشی دیگر کم‌تر است (۱٤۰۳ K) و پس از آن لولهٔ تابشی U شکل قرار دارد (۱٤۹۳ K) و دمای خروجی گازهای احتراق در لولهٔ تابشی مستقیم از همه بیشتر است (۱٥٤٦ K)، به همین علت راندمان لولهٔ تابشی W شکل دارای بیشترین مقدار ٥٥/۳٪ است و پس از آن U شکل و در نهایت لولهٔ تابشی مستقیم کم‌ترین راندمان را دارند. نسبت مقدار انتقال حرارت تشعشعی به انتقال حرارت کل در هر سه نوع لولهٔ تابشی بالا و بیش از ۹۰ درصد می‌باشد و تنها در نوع W شکل به‌میزان ناچیزی این نسبت از دو نوع لولهٔ تابشی دیگر بیشتر است.

جدول ۲ مقادیر برخی پارامترها برای سه لولهٔ تابشی مستقیم، U شکل و W شکل

شکل لوله تابشی	T_{max} (K)	T_{out} (K)	$T_{max,w}$ (K)	η_{max} (K)	NO_{outlet} (PPM)	$\frac{Q_{radiation}}{Q_{total}}$ (%)
مستقیم	۲۳٥۲	۱٥٤٦	۱۰۷٦	٥۲/٥	۳۱۲	۹۲/٦
U شکل	۲۳٦۰	۱٤۹۳	۱۰۹۸	٥۳/۲	۳۳٦	۹۲/٦
W شکل	۲۳٤٤	۱٤۰۳	۱۰۹۹	٥٥/۳	۲۸۸	۹۲/۸

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از مقایسهٔ سه نوع لولهٔ تابشی به شرح زیر می‌باشد:

۱. مقدار انتشار آلایندهٔ اکسید نیتروژن در لولهٔ تابشی U شکل در مقایسه با لوله‌های تابشی مستقیم و W شکل بیشترین مقدار و در نوع W شکل کم‌ترین مقدار است.

۲. راندمان لولهٔ تابشی W شکل نسبت‌به دو نوع لولهٔ تابشی دیگر بیشتر و پس از آن لولهٔ تابشی U شکل قرار دارد.

۳. نسبت انتقال حرارت تابشی از سطح دیواره به کل انتقال حرارت از سطح دیواره در هر سه نوع لولهٔ تابشی بالا و بیش از ۹۰ درصد است.

واژه نامه

لوله تابشی	Radiant tube
غیر پیش آمیخته	Non-premixed
حل عددی	Numerical solution
احتراق	Combustion
بازده	Efficiency
استقلال از شبکه	Grid independence

مراجع

1. Wuenning, J., "Industrial Gases/Combustion-Self-Regenerative Burner for Single-Ended, P and Double-P Radiant Tubes-A New Type of Regenerative Burner Has Been Designed for Radiant-Tube Heating", This article, *Industrial Heating*, Vol. 74, No. 6, Pp. 47-50, (2007).
2. Wunning, J., "Retrofitting Radiant Tube-Heated Furnaces", *Industrial Heating*, Vol. 70, No. 6, Pp. 41-43, (2003).
3. Liu, X., Tian, Y., Yu, Y., Wen, Z., Zhang, D., Li, Z., and Feng, X. J. F., "Experimental Studies on the Heating Performance and Emission Characteristics of a W-Shaped Regenerative Radiant Tube Burner", *Fuel*, Vol. 135, Pp. 262-268, (2014).
4. Zhong, G., Wang, D., and Wu, D. J. E. P., "Application of Double-Regenerative Radiant Tube Technology on Roller Hearth Normalizing Furnace", *Energy Procedia*, Vol. 66, Pp. 201-204, (2015).

5. Wang, Y., Zhang, J. Li, L., Ling, H., and Li, Y. J. J., "Numerical Simulation of the Thermal Process in a W-Shape Radiant Tube Burner", *The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 66, No. 7, Pp. 1253-1264, (2014).
6. Xu, Q., and Feng, J. J. A. T. E., "Analysis of Nozzle Designs on Zoned and Staged Double P-Type Gas-Fired Radiant Tube", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 114, Pp. 44-50, (2017).
7. Scribano, G., Solero, G., Coghe, A. J. E. T., and Science, F., "Pollutant Emissions Reduction and Performance Optimization of an Industrial Radiant Tube Burner", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, No. 7, Pp. 605-612, (2006).
8. Ahanj, M. D., Rahimi, M., Alsairafi, A. A., "CFD Modeling of a Radiant Tube Heater", Vol. 39, No. 3, Pp. 432-438, (2012).
9. Chuenchit, C., Jugjai, S. J. J. o. R., and Engineering, A. i. M., "Effect of Tube Length on Combustion Characteristics of a Self-Aspirating Radiant Tube Burner (SRTB)", *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 2, Pp. 19-23, (2012).
10. Niederer, M., Steinböck, A., Strommer, S., and Kugi, A., "Control of Radiant Tubes in an Indirect-Fired Strip Annealing Furnace for Improved Efficiency", *Proceedings of European Control Conference ECC*, IEEE, Pp. 4106-4111, 2013.
11. ANSYS Fluent Theory Guide 15.0, *Inc, Canonsburg, PA*, (2013).
12. Çengel, Y. A., and Boles, M. A., "Thermodynamics: An Engineering Approach",-PDF: McGraw-Hill, (2008).

Numerical Study of the Effects of Structural and Functional Parameters on Unmixed Combustion of Natural Gas in Three Radiant Tubes with Different Geometries

Mahdi Niknam-Azodi[1]

Mohammad Moghiman[2]

1. Introduction

Radiant pipes or industrial heat pipes have several models and geometries. The simplest model and design is the I-shaped geometry with a burner on one side and the combustion gases on the other side. This type of radiation tube has been found only in Europe in last years. The reason for low use of this type of radiant tube is lack of preheating of combustion air problems related to sealing the moving part of the radiant tube due to thermal stress, insufficient uniform temperature distribution on the radiant tube surface and high flue gas temperature at the tube outlet. For a large surface, I-shaped radiation tubes can be expanded by creating additional bends and arms to create U-shaped and W-shaped radiation tubes. The radiant surfaces of the tubes can be enlarged. For I-shaped, U-shaped and W-shaped radiant tubes, the burner is located at one end and the flue gas outlet at the other end. In a one-way irradiated tube without a return, an internal tube of I-shaped is placed and the opposite side of the burner is closed. The burner is placed inside the inner tube and the flue gases first move inside the inner tube and return through the annular space between the inner tube and the radiant tube. Non-return irradiated tubes such as U-shaped and W-shaped tubes are more commonly used in the US market.

In industrial heat exchangers, uniform temperature distribution is important for achieving uniform heat transfer to products or the environment, maximum heat transfer, and long life of radiant tubes.

2. Validation

In this section, all the steps of numerical simulation including solution validation, comparison of combustion modeling results with experimental data, network independence and comparison of three main types of direct radiation tube, U-shaped and W-shaped will be presented.

Before discussing the results, the present modeling firstly validated by comparing the simulation results for a W-shaped radiation tube with the experimental data of Wang et al. Figure 1(a) shows the measured temperatures obtained from numerical simulations. The temperature measurement points are shown in Figure 1(b). As observed, the numerical results are reasonably consistent with the experimental data and the maximum error is less than 10%, which is an acceptable error for simulating combustion.

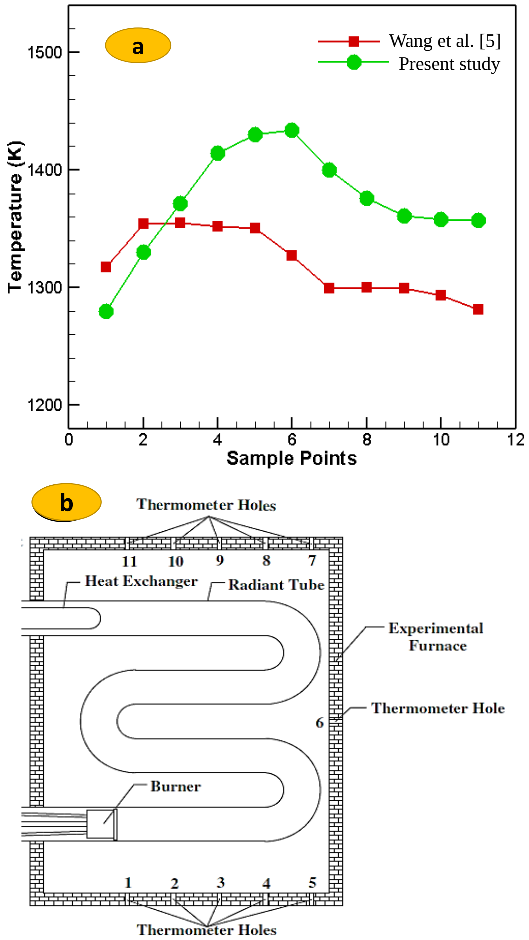


Figure 1. a) Validation of current study and experimental data, b) Points whose temperature is measured in validation

3. Results and discussion

Figure 2 shows the temperature distribution on the surface of the radiant tube in all three types of radiant tubes. The maximum temperature on the W-shaped wall is about 1099 K and is higher than the other two types. Another important factor that can be considered is the temperature uniformity. Temperature uniformity is an important issue

[1] M. Sc. student of energy conversion, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

[2] Corresponding Author. Professor of energy conversion, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: Moghiman@um.ac.ir

because it leads to longer life of the tube. However, the higher difference in temperatures of the radiant tube surface causes thermal stresses in the tube wall and reduces its life. According to Figure 2, the U-shaped tube has the highest uniformity among the other tubes.

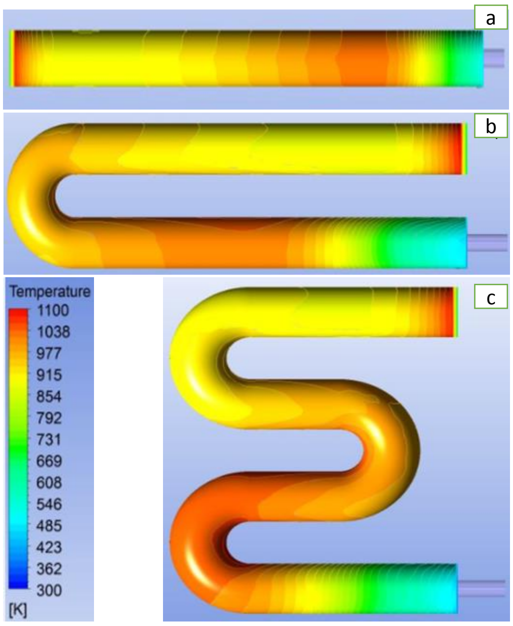


Figure 2. Surface temperature distribution of three direct, U-shaped and W-shaped hotplates

Table 1 lists the important performance parameters in the three types of studied ones. As can be seen, the amount of nitrogen oxide pollutants in the output of the U-shaped tube is higher than that of the direct and W-shaped radiant tube due to the higher maximum temperature of the gases. The outlet temperature of the gases in the W-shaped radiant tube is lower than the other two types of radiant tubes (K 1403). Furthermore, the outlet temperature of the combustion gases in the direct radiant tube is the highest (1546 K). Thus, the efficiency of W-shaped radiation tube has the highest value of 55.3%, followed by U-shaped, and finally direct radiation tube has the lowest efficiency. The ratio of radiant heat transfer to total heat transfer in all three types of radiant tubes is high and more than 90%, and only in the W-shaped type, this ratio is slightly higher than the two other types of them.

Table 1. The values of some parameters for the three direct radiation tubes, U-shaped and W-shaped

$\frac{Q_{radiation}}{Q_{total}}$ (%)	no_{outlet} (PPM)	$\eta_{Radiant\,Tube}$ (%)	$T_{max,w}$ (K)	T_{out} (K)	T_{max} (K)	
92.6	312	52.5	1076	1546	2352	I-shaped
92.6	336	53.2	1098	1493	2360	U-shaped
92.8	288	55.3	1099	1403	2344	W-shaped

4. Conclusion

The most important results obtained from comparing three types of radiation tubes are as follows:

- The amount of nitrogen oxide emission in the U-shaped radiant tube is the highest and the lowest in the W-shaped tube compared to other ones;
- The efficiency of W-shaped radiation tube is higher than the two other types of radiation tube. The next one is U-shaped radiation tube which has higher efficiency than direct tube.
- The ratio of radiant heat transfer from the wall surface to the total heat transfer in all three types of radiant tubes is high and more than 90%. Moreover, the W-shaped one has the highest value.